

学校编码：10384
学号：200133002

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学
硕 士 学 位 论 文

啤酒发酵过程温度控制系统的仿真研究

Simulation of Temperature control for Beer fermentation

吉君

指导教师姓名：江青茵 教授

专 业 名 称：化学工程

论文提交日期：2004 年 6 月

论文答辩时间：2004 年 6 月

学位授予日期：2004 年 月

答辩委员会主席：_____

评 阅 人：_____

2004 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人（签名）：

2004 年 6 月 10 日

摘要

啤酒生产是我国的一个传统产业,随着国民经济的发展和人民生活的改善,我国啤酒工业也得到空前发展,近 20 年来,我国的啤酒产量已经增长了 30 多倍。啤酒发酵温度控制过程是啤酒生产中的一个关键环节,直接影响啤酒的质量和生产。目前有关啤酒发酵过程温度控制的各种控制方式,其控制器的输出都是连续的,只适用于调节阀,而适用于开关阀的开关控制(Bang-Bang 控制)研究还很少。同时由于啤酒发酵过程属于生物放热反应过程,其内在机理非常复杂,又由于其大时间常数、时变、大纯滞后等特点,因而很难得到其过程精确的数学模型。

本文的工作主要是针对以上两个问题展开的,试图运用因素空间理论和 Smith 预估搜寻算法对啤酒发酵温度控制这一过程所存在的问题进行改进。

对于开关控制,本文在因素空间变权理论的基础上,提出了一种新型的智能开关控制算法。首先介绍了相关的因素空间理论基础,然后根据模糊决策的思路确定了智能开关控制的求解步骤,借鉴 PID 控制的特点确定了其相关因素及其隶属度函数,经过推导得到均衡变权公式,最后对一阶过程和二阶过程进行了仿真研究,得出:这种新型的智能开关控制算法特别适用于大时间常数的过程,避免了控制器的频繁切换,无需整定参数,控制效果好于传统的 PID - BangBang 控制。

啤酒发酵过程是一个存在大纯滞后的过程,目前纯滞后的补偿方法主要是 Smith 预估控制。但由于要获取啤酒发酵温度对象的精确模型还存在理论上和工艺上的限制,而常规 Smith 预估补偿控制在未知精确数学模型的情况下,往往得不到较好的补偿效果,所以本文采用了 Smith 预估搜寻控制算法。它克服了对模型精度要求较高的缺点,对大时滞、时变对象的控制表现出了很强的鲁棒性,并具有理想的控制品质,适合于啤酒发酵温度控制过程。通过仿真试验研究了在模型失配情况下,单个预估模型参数 K 、 T 、 t 对控制效果的影响程度以及预估模型参数失配方向的对控制效果的影响,总结出了预估模型参数的设置规律。

最后本文分析了基于热量平衡关系的啤酒温度控制数学模型,将温度与冷液流量之间的关系转化为具有纯滞后的一阶或二阶惯性环节。然后运用智能开关控制算法结合 Smith 预估搜寻算法对啤酒发酵的温度控制过程进行了仿真,取得了较好的控制效果。在改变预估模型参数和被控对象模型的情况下,仍然能够较好的将温度控制在 ± 0.3 ,具有良好的鲁棒性。

关键词: 啤酒发酵; Bang-Bang 控制; Smith 预估搜寻

ABSTRACT

Beer production is one of traditional industry in our country. With the development of civil economy and the improvement of demotic living condition, beer industry has also been rapidly improved. In the recent two decades, the yield of beer products has mounted up to more than 30 times. Beer fermentation is the key process of beer production and the quality of beer depends directly on the variation of temperature.

In recent report, the output of the temperature controller in the beer fermentation is mostly continuous and depends on the servo valve. But most factories in our country would like to use the on-off valve because it is cheaper than the servo valve. So the Bang-Bang controller is more suitable for the temperature control systems. But the research about Bang-Bang controller is few in the internal and overseas publication. In this paper, a AI Bang-Bang temperature controller is induced based on factor space theory.

The beer fermentation is a biochemical reaction of heat release and its internal mechanism is very complex with great time constant, time variant, large time delay. Although Smith predictor is commonly regarded as an effective method to compensate system with large time delay, the robustness of conventional Smith predictors is poor. So the direct application of conventional Smith predictor can not work well in temperature control. For this reason, this paper concentrated on the Smith predictive search algorithm with preferable robustness and the simulation shows good result.

The first part of this paper is put attention on the new AI Bang-Bang controller which is brought out based on variable-weight theory in factor space. The AI Bang-Bang control problem was summarized based on fuzzy decision and membership function was defined according to the characteristic of PID control. The formula on balance function and variable weight was gotten through deducing. Simulation on first - order system and second - order system was done and it shows better result than PID - BangBang control. The new algorithm specially suits to the system with large time constant. In addition, it is not necessary to calculate the parameters and avoids the switchover of the on-off controller.

The second part of this paper focus on Smith predictive search algorithm. It overcomes the shortcoming of conventional Smith predictor which required precise model. High robustness and good control quality are excellence of Smith predictive search algorithm for controlling large time delay and time varying objects such as beer fermentation. Through the simulation, we draw the conclusion that single parameter of predictive model has different effect to control performance when it is mismatched. The mismatched direction of parameters has different effect to the control performance. Some law about parameters setting which is effective was got by simulation.

In the last part, a mechanism model of beer fermentation according to energy balance was analyzed. The relationship between temperature and cold volume flow is time relay plus first-order

system or second-order system. The simulation was done for the beer fermentation temperature control by the new AI Bang-Bang controller combining Smith predictive search algorithm. Even the parameters of predictive model or beer fermentation model changed, the temperature can also be controlled within the range of ± 0.3 . The result shows that this new algorithm is better than conventional PID control. In addition, the new algorithm is not necessary to calculate the parameters and has more useable in the industry process control.

Keyword: beer fermentation ; Bang-Bang control ; Smith predictive search algorithm

目录

第一章 前言	1
1.1 啤酒发酵概述	1
1.1.1 啤酒工业现状	1
1.1.2.啤酒发酵工艺过程	2
1.1.3.啤酒发酵机理	3
1.1.4.啤酒发酵温度控制重要性及工艺曲线	4
1.1.5 发酵系统特性分析	6
1.1.6.发酵过程温度控制特点	8
1.1.7 开关控制方式的优越性	9
1.2.啤酒发酵温度控制现状	10
1.3 论文工作安排	15
第二章 基于因素空间理论的 Bang - Bang 控制算法研究	17
2.1 Bang - Bang 控制简介	17
2.2 因素空间理论简介	19
2.2.1 因素空间理论发展简介	19
2.2.2 因素空间基本理论简述	21
2.3 基于因素变权的 Bang - Bang 控制	25
2.3.1 因素 Bang - Bang 控制的步骤	25
2.3.2 相关因素的确定	26
2.3.3 隶属函数的确定	28
2.3.4 综合函数的确定	28
2.4 因素变权 Bang - Bang 控制的仿真研究	29
2.4.1 一阶对象的仿真研究	29
2.4.2 二阶对象的仿真研究	34
2.5 小结	37
第三章 Smith 预估搜寻控制算法鲁棒性研究	38
3.1 Smith 预估控制原理简介	39
3.2.Smith 预估搜寻算法及闭环特性	40
3.3.Smith 预估搜寻算法鲁棒性研究	42
3.3.1.一阶对象的仿真研究	44
3.3.2 二阶对象的仿真研究	55

3.4 小结	59
第四章 啤酒发酵过程的温度控制仿真	61
4.1 数学模型概述	61
4.2.啤酒发酵温度控制机理模型分析	62
4.3.啤酒发酵温度控制仿真	65
4.3.1 啤酒发酵温度控制单变量仿真	66
4.3.2 啤酒发酵温度控制多变量仿真	68
4.4 小结	74
第五章 结论	76
附录	78
参考文献	80
致谢	87

CONTENT

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Summarize on Beer Fermentation	1
1.1.1 <i>Present Status of Beer Fermentation</i>	1
1.1.2 <i>Technical Process of Beer Fermentation</i>	2
1.1.3 <i>Mechanics of Beer Fermentation</i>	3
1.1.4 <i>Importance and Cure of Beer Fermentation Temperature Control</i>	4
1.1.5 <i>Analysis of Beer Fermentation Process</i>	6
1.1.6 <i>Characteristic of Beer Fermentation Temperature Control</i>	8
1.1.7 <i>Merits of On-off Control</i>	9
1.2. Present Status of Beer Fermentation Temperature Control	10
1.3 Arrangement of Paper	15
 Chapter 2 Research of Bang-Bang Control Algorithm Based on the Factor Space Theory	17
2.1 Introduction of Bang - Bang Control	17
2.2 Introduction of Factor Space Theory	19
2.2.1 <i>Development of Factor Space Theory</i>	19
2.2.2 <i>Foundation of Factor Space Theory</i>	21
2.3 Bang-Bang Control Based on Variable-Weight Theory	25
2.3.1 <i>Step of Bang-Bang Control Based on Factor Space</i>	25
2.3.2 <i>Decision of Relative Factor</i>	26
2.3.3 <i>Decision of Membership Function</i>	28
2.3.4 <i>Decision of Synthesis Function</i>	28
2.4 Simulation on Bang-Bang Control of Factor Space	29
2.4.1 <i>Simulation on First-Order System</i>	29
2.4.2 <i>Simulation on Second-Order System</i>	34
2.5 Summariz	37
 Chapter3 Research on Robustness of Smith-Predictive Search Algorithm	38
3.1 Introduction of Smith Predictive Control	39
3.2 Close Loop's Characteristic of Smith Predictive Search Algorithm	40
3.3 Research on Robustness of Smith-Predictive Search Algorithm	42
3.3.1 <i>Simulation on First-Order System</i>	44

3.3.2 <i>Simulation on Second-Order System</i>	55
3.4 Summarize	59
Chapter 4 Simulation of Beer Fermentation Temperature Control	61
4.1 Summarize of Mathematics Model	61
4.2 Analysis of Mechanism Model	62
4.3 Simulation on Beer Fermentation Temperature Control	65
4.3.1 <i>Simulation of Single-Variable System of Beer Fermentation</i> <i>Temperature Control</i>	66
4.3.2 <i>Simulation of Multivariable System of Beer Fermentation</i> <i>Temperature Control</i>	68
4.4 Summarize	74
Chapter5 Conclusion	76
Appendix	78
Reference	80
Thanks	87

第一章 前言

1.1 啤酒发酵概述

1.1.1 啤酒工业现状^{[1][2]}

啤酒是一种富有营养价值的低度饮料酒，也是世界公认的营养食品，素有“液体面包”的雅称，目前已成为长盛不衰的国际饮料。啤酒以大麦和其它谷物为原料，并添加少量酒花，采用制麦芽、糖化、发酵等特定工艺酿制而成。它是一种含有少量酒精和充足二氧化碳、具有酒花香、爽口苦味的低度酿造酒，它还含有多种氨基酸、维生素、糖类和无机盐等成分，易为人体吸收。世界营养食品会议推荐啤酒为营养食品，啤酒将是世界饮料酒的发展方向。

啤酒是世界上产量最大的酒种，全世界年产量约为 1 亿多吨，约由 130 个国家生产啤酒，人均消费为 24 升左右。美国产量最多，年产量约 2300 万吨，而啤酒人均消耗水平最高的国家为德国、捷克等，平均每人每年消费啤酒在 160 升以上。随着改革开放，经济建设迅速发展，人民生活水平不断提高，啤酒在我国已逐渐成为人们的时尚饮品，市场的宠儿，生产量直线上升。我国啤酒产量在九十年代已达到 1500 万吨，超过了德国，一跃成为仅次于美国的世界第二大啤酒产销国，令世界啤酒界人士刮目相看。但是，我国人均啤酒消费水平只有 8 升，仅为世界水平的 1/3，差距很大，因此我国的啤酒工业仍有很大的发展潜力。

啤酒的生产技术，以德国、丹麦等国较为先进。目前，世界啤酒工业总的技术特点是朝着设备大型化、自动化、生产周期短、经济效益高的方向发展。我国的啤酒工业有 90 多年的历史，但是出于历史的原因，我国最初的一些啤酒厂是由外商建立的。近十年来，我国的啤酒工业得到了迅速发展，引进和吸收了国外先进技术，例如：缩短制麦和发酵周期、连续发酵法、高浓度发酵法、酒花粉和漩涡分离槽、酶制剂糖化法以及露天发

酵罐的应用等。但是总的来说，由于起步较晚，生产设备都比较落后，自动化程度较低，因而产品效率较低，产品质量也不高，吨酒能耗较大，这些都是我国啤酒生产中待解决的问题。

1.1.2. 啤酒发酵工艺过程

啤酒生产过程包括：



图 1.1 啤酒生产过程示意图

(1) 麦芽的制造：把原料大麦制成麦芽，习惯上称为制麦。将原料大麦先进行除杂，精选分级，然后浸渍再进行发芽，经干燥烘培制成，它是啤酒生产过程的开始。麦芽制备工艺决定了麦芽的品种和质量，从而决定了啤酒类型，并直接影响到酿造工艺和成品质量。

(2) 麦芽汁的制备：麦芽汁的制备过程，俗称糖化。将麦芽粉碎与温水混合，借助麦芽自身的多种水解酶，将淀粉和蛋白质等高分子物质进一步分解成可溶性低分子的糖类、糊精、氨基酸、肽等，制成麦芽汁，这就是糖化的过程。过滤所得的麦汁，加酒花煮沸并浓缩到所要求的浓度，然后分离酒花并冷却至发酵温度。

(3) 发酵：传统的发酵法是将啤酒酵母接入麦芽汁，经过前酵和后酵两个阶段（分别在两个罐内进行）。其特点是将冷却后的麦汁装入开口发酵槽中，加入啤酒酵母，一般控制发酵液温为 $9 \sim 10^{\circ}\text{C}$ ，发酵 $7 \sim 10$ 天，麦汁发酵成嫩啤酒，酵母增殖到添加量的 $2 \sim 4$ 倍。后发酵又称贮酒，嫩啤酒输入到贮酒室内的贮酒罐中，一般在 $0 \sim 3^{\circ}\text{C}$ 下贮酒 $42 \sim 60$ 天，达到啤酒成熟、二氧化碳饱和和啤酒澄清的目的。在啤酒贮酒期结束后并过滤得到清酒，便完成了整个酿造过程。

(4) 罐装：经过滤的鲜啤酒根据产品的规格与包装要求进行罐装杀菌，

以及贴标签等操作获得成品啤酒。

近 20 年来啤酒发酵罐有很大的变革，目前大多数厂家采用一罐法。一罐法就是将前酵、后酵两个阶段合在一个锥形罐中进行，麦汁在罐内完成全部发酵的过程。锥形罐啤酒发酵过程的特点是：大罐通常能容纳 1 天所产的麦计量，具有回收酵母方便、可回收 CO_2 以及使发酵液自然对流等特点，且便于用计算机进行啤酒发酵过程控制。选用锥形罐进行密闭发酵，发酵期间罐内产生一定压力，容易控制和调节发酵温度，一般选用较高的发酵温度（ $10 \sim 16$ ），加速双乙酰还原，酿制出的啤酒更具淡、清、爽之风格。这种发酵方式，显示出投资省、见效快、产量高、发酵时间短（ $21 \sim 28$ 天，短的只有 14 天）。

啤酒的发酵过程是在啤酒罐中进行的。啤酒的发酵罐如图 1.2 所示，上部呈圆柱形，下部成倒圆锥形，罐壁上盘绕着冷却管道，分为相互独立的上、中、下三条冷却带，罐的最外层是保温层，顶部是密封阀，底部为物料通路。啤酒发酵温度控制就是利用冷媒介质对罐内温度进行分段控制。根据啤酒发酵的工艺要求，当啤酒发酵温度高于工艺要求温度时，打开冷媒，通过啤酒罐罐壁的冷却带给啤酒降温；当发酵温度低于工艺要求时，关闭冷媒，则啤酒按工艺要求继续发酵。

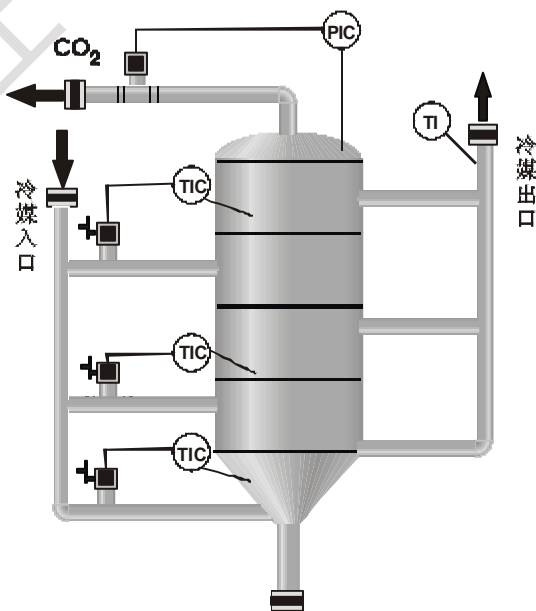
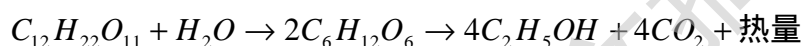


图 1.2 发酵罐温度控制示意图

1.1.1.3. 啤酒发酵机理

啤酒的发酵主要是靠酵母的代谢作用，麦芽汁中的氨基酸为主要氮源，可发酵糖类（麦芽糖、麦芽二糖、葡萄糖、果糖、蔗糖）为主要碳源，经呼吸作用，从中获取能量而生长。在无氧条件下，酵母进行无氧发酵，可发酵糖类被发酵，产生乙醇和二氧化碳，并释放出能量，发酵过程是糖的生物氧化过程，可发酵糖类放出的能量，一部分转移至 ATP 高能键中作为酵母获取能量的来源，另一部分则以热能的形式而散失到发酵液中，使其温度上升。这一过程的主要反应式为



麦芽糖（342 克）	葡萄糖	酒精	56 千卡
------------	-----	----	-------

麦芽汁中的可发酵糖类组成与使用原料和糖化的方法有关。一般来讲，麦芽汁中可发酵性糖占总糖的 70% 左右，其中占 96% 的可发酵性糖发酵成乙醇和二氧化碳，1.5% 合成新酵母细胞，2.5% 生成其它发酵副产物。发酵副产物主要成分包括：高级醇类，醛与酮类，脂肪酸和其它有机酸酯类，连二酮（双乙酰），硫化物等，其中高级醇（如异戊醇，- 苯乙醇）和醋酸乙酯、醋酸异戊酯及醋酸苯乙酯是构成啤酒香味的主要成分，而乙醛、双乙酰和硫化氢，则构成啤酒中的生青味，对啤酒风味影响很大。

1.1.4. 啤酒发酵温度控制重要性及工艺曲线

发酵过程是整个啤酒生产的重要环节。这一过程就是利用发酵罐内提供的营养物质使菌体繁殖，利用菌体的物质代谢而生产目的物，是比较复杂的生物化学反应过程。发酵工艺的目的，是使整批啤酒具有一定的色味。影响发酵质量的因素有很多，包括温度，PH 值，溶解氧，CO₂，气体中溶解氧，菌种好坏等。如果这些参数控制的好，将会大大提高发酵过程的质量。但由于检测手段的不完善，不可能也没有必要对所有因素都进行控制，只需对主要因素进行控制。

啤酒发酵是在锥型罐内进行的，在发酵期间，对工艺操作的控制，主要是针对温度、糖度这两个参数，而糖度的变化也主要取决于温度变化。发酵温度的高低直接影响发酵时间长短，发酵过程温度高，发酵过程较快，可缩短发酵周期，有利于设备使用有利于提高设备利用率，经济上较为合理。但高温发酵产生的发酵副产物较多，在啤酒的口味、澄清度、保存期和泡沫稳定性等方面，均不及低温发酵。低温发酵过程，副产物产生的少，有利于提高啤酒质量，泡沫多，味道纯。

发酵工艺曲线是针对某种发酵方法，一定的酵母菌种、麦芽汁等配料，在多年实践研究的基础上，制定出的一条发酵温度变化曲线，希望发酵时，过程中的温度按照工艺曲线进行控制。图 1.3 中所示的曲线是啤酒发酵温度控制工艺曲线，根据机理合目的的不同，可分为五个工艺段：发酵，双乙酰还原，酵母回收，熟化及冷却。

(1) 发酵 (图中 段): 当冷却的麦芽汁接入酵母，进入发酵罐后，开始进行发酵。温度自然升高，产生的二氧化碳气体使罐内酒液流动，有利于发酵液与酵母充分接触。当罐温升到 T_b 后，保持 T_b 恒温，稳住降糖速率。

(2) 双乙酰还原 (图中 段): 在此段酵母继续与麦芽汁中剩余的可发酵性糖作用，使液温升高，温度越高，- 乙酰乳酸的非酶分解越快，双乙酰还原就越快。同时，还可利用酵母的还原酶将双乙酰还原成 2、3 丁二醇。但是温度过高，会产生其它的副产物，如酯类、醇类等。当罐温达到 T_c 后，保持 T_c 恒定，使罐内双乙酰充分被还原，当糖度下降到某一规定值或乙酰含量低于规定值时，转入下一工艺段。

(3) 酵母回收 (图中 段): 当主发酵段完成后，回收酵母，以备其它罐发酵时用，排放酵母前，必须进行锥部降温，使酵母沉淀，当锥部温度下降到 T_d 后，可回收酵母。

(4) 熟化 (图中 段): 酵母回收完毕后，应全面降温到 T_d 促进啤酒口

味成熟。由于酵母已被回收，残糖也不多，罐内仅有微量的残余酵母代谢反应，基本处于稳定平衡阶段。保持一天后，可转入下一工艺段。

(5) 冷却(图中 段): 在出酒前，至少要进行 48 小时冷却过程，这期间悬浮酵母、酒花等物质将缓慢沉淀下来，酒液逐渐澄清，便于过滤。另外，一些易形成混浊的蛋白质逐渐析出而沉淀，改善了啤酒的稳定性，提高了啤酒质量。冷却过程需注意温度不能使罐内温度过低，防止啤酒结冰。

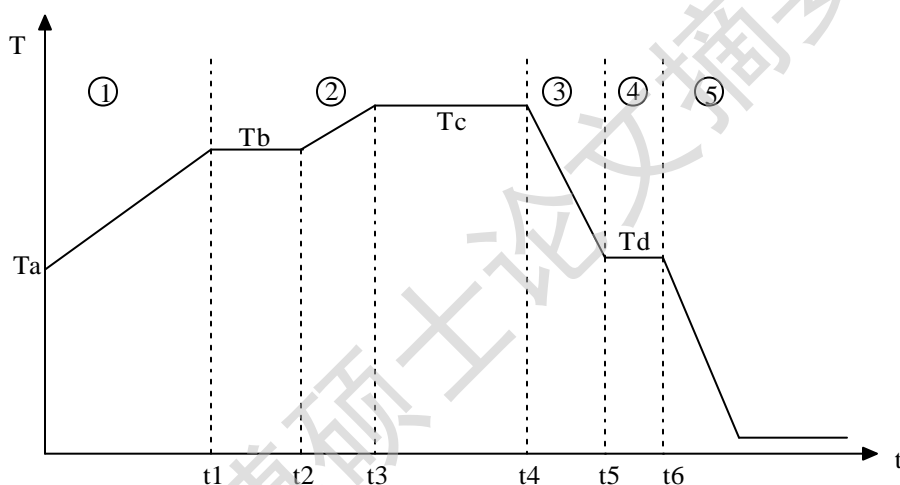


图 1.3 啤酒发酵温度控制工艺曲线

1.1.1.5 发酵系统特性分析

根据工艺及经验知识，当处于高温发酵 $15 \sim 8.5$ 时，温度应上低下高。温度高的液体密度低，温度低的液体密度高，因而温度高的部分受到的浮力大于重力，这部分液体上升，而温度低的部分受到的浮力小于重力，这部分液体下沉，冷的液体下沉与热的液体上升形成对流。锥形罐内对流情况是由下向上流动，靠罐壁是由上向下流动，所以底部的冷却带无须加冷液，底部的液体也能被降温，同时由于内外换热属于导热形式，速度极慢，因而往往是底部不加冷液而温度基本保持不变。所以，对于控制而言，在高温发酵时，可以将下部的冷却带阀门完全关闭而无须供给冷液，下部

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库